

分光分析手法によるクラゲ検知システム

戸田勝善*・樋口宏一*・矢田貞美*

A Jellyfish Monitoring System for Power Plants with a Spectrum Analysis Method

Masayoshi TODA*, Kohich HIGUCHI* and Sadami YADA*

Abstract

This paper presents a jellyfish monitoring system for power plants with a spectrum analysis method to measure degrees of jellyfish density in the sea. This system consists of the jellyfish milling system and the optical measuring system. The former system samples jellyfishes and water in the sea, mills them and develops *jellyfish-water*, mixture of jellyfish fragments and water. We choose the concentration of jellyfish-water as a parameter which represents degrees of jellyfish density quantitatively. The optical measuring system estimates this concentration by measuring the optical transmissivity of the sample.

To optimize these systems, the spectral characteristics of jellyfish-water and some important conditions deciding the ability of measurements were examined, and the following results were acquired.

1) Two factors, wavelength of transmitted light sampled and size of jellyfish fragments, mainly have effect on the measurement.

2) To obtain the measuring curve between the transmissivity and the concentration of jellyfish-water, the logarithmic regression function based on Lambert-Beer theory is sufficiently useful; this function requires some compensation considering such a factor as multiple scattering light.

3) With this measuring curve, the standard estimation error of the concentration ranges from 0.4 to 0.6 %.

Eventually, the availability of this monitoring system for actual applications was confirmed.

keywords: jellyfish monitoring system, spectrum analysis, power plant, concentration measurement

1. はじめに

発電用冷却水として海水を利用しているプラントにとって、沿岸域におけるクラゲの大量発生は、冷却水の供給を妨げ、安定発電を阻害する重大な問題である。とくに、電力需要の最も高い夏期は、クラゲ出現の最盛期（ミズクラゲの場合は国内で3月から10月（安田, 1990））でもあり、問題がますます深刻である。

近年、冷却水用取水口へのクラゲの流入を防止するために、飯島・川辺（1990）によるエアバブリング装置や佐藤（1990）による水流発生装置を用いた対策等

が試みられている（戸田, 1990；石井, 1990）。これらの装置の作動には、水中カメラ等によるクラゲ発生状況の監視業務が常時必要である。現時点では、この業務は人手によって行っており、防除システムの自動化のために、クラゲの発生を自動的に検知するシステムの開発が期待されている。

クラゲの検知に関しては、光センサ（野上, 1990）や超音波センサ（太田, 1990；斎藤ほか, 1990）による手法が試みられている。しかし、これらは、限定された条件下での、各センサに対するクラゲの特性研究にとどまり、検知手法に結びつくような具体的な成果は未だ得られていない。このほか、稲垣・豊川（1991）は周波数の異なる魚群探知器（50kHz および 200kHz）を併用して、クラゲ群集を検知することを試み、その可能性について検討しているが、クラゲの

1995年8月2日受理

*東京水産大学 海洋生産学科 東京都港区港南4-5-7

*Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Konan 4-5-7, Minato-ku, Tokyo

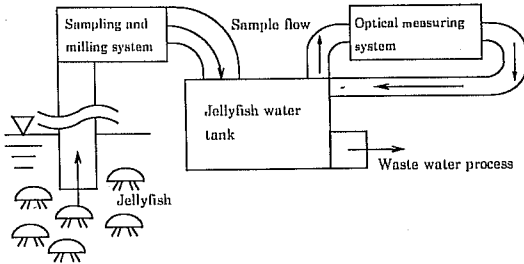


Fig.1 Schematic diagram of jellyfish monitoring system

出現密度の定量的な把握にまでは至っていない。

そこで、筆者らは、クラゲ出現密度の定量的計測を目的とした、分光分析手法による検知システムを提案する。システムの概要を Fig.1 に示す。このシステムは二つの主要なサブシステム「粉砕システム」および「分光計測システム」より構成される。粉砕システムは海水とともにクラゲを採取し、これを適当な大きさに粉砕する。ここで粉砕したクラゲ（クラゲ片）と海水の混合懸濁液（クラゲ水）をタンクに送り、攪拌する。分光計測システムは、このタンクよりクラゲ水を採取し、クラゲ水におけるクラゲの重量濃度（クラゲ水濃度）を分光分析によって計測する。このクラゲ水濃度を、クラゲ出現密度の定量的指標とする。

本論文では、クラゲ水濃度の定量的計測に主眼において、各サブシステムでの手法を確立し、本検知システムを評価するために以下のことを行う。第2節ではクラゲ水の分光特性を計測し、濃度計測を行う際の重要な諸パラメータについて検討する。さらに、第3節では粉砕システム、第4節では分光計測システムの検討および評価を行い、本手法の実用可能性を示す。

2. クラゲ水の分光特性

本節では、クラゲ水濃度の計測に分光特性（透過率）を利用する方法を紹介する。さらに、クラゲ水の透過率を計測し、透過光の波長およびクラゲ片の粒径が計測に与える影響について検討する。

2.1 光の透過率によるクラゲ水濃度の計測

計測における諸仮定および原理について述べる。同様の原理は、濁度計等に利用されており、近年では、平松ら（1992）が海中の浮遊粘性微細底泥の濃度計測に応用している。

溶液内に光を入射した場合、入射光の強度 I_0 と透過光の強度 I_t の関係は、Lambert-Beer の法則より次式で表される（中原，1987）。

$$I_t = I_0 \exp(-\epsilon_\lambda c l) \quad (1)$$

ϵ : 吸光係数, c : 溶液の濃度, l : 光路長

ただし、添字 λ は波長 λ に依存する量であることを示す（以下同様）。これを、懸濁液に適用するために拡張した式は次のように表される（黒木・松生，1982）。

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha_\lambda l) \quad (2)$$

$$\alpha_\lambda = \alpha_{1\lambda} + \alpha_{2\lambda} + \alpha_{3\lambda} \quad (3)$$

$$\alpha_{i\lambda} = a_{i\lambda} + b_{i\lambda} \quad (i=1, 2, 3) \quad (4)$$

α : 消散係数, a : 吸収係数, b : 散乱係数

ただし、添字 1, 2 および 3 は、それぞれ水自身、懸濁物および溶存物による係数であることを示す。式(2)をクラゲ水の濃度計測に適用するために、以下の仮定を設定する。

- 1) 溶存物質による散乱係数はほとんど無視できる（黒木・松生，1982）。
- 2) 懸濁物質・溶存物質による吸収係数は Lambert-Beer の理論により、それぞれ濃度に比例すると考えてよい（黒木・松生，1982；中原，1987）。懸濁物質の散乱係数に関しては、対象であるクラゲ片の粒径が 1 mm 以上であるので、Mie の理論はそのまま適用できないが、簡単のために散乱係数も濃度に比例すると考える。
- 3) 透過率の計測の際には、 I_0 ではなくサンプルと同一のセルに入れた海水のみを透過させた光の強度 I_w を基準とする。このときの I_w は次式で与えられる。

$$I_w = I_0 \exp\{-(\alpha_{1\lambda} + \alpha_{w2\lambda} + \alpha_{w3\lambda})l\} \quad (5)$$

- ただし、 $\alpha_{w2\lambda}$ および $\alpha_{w3\lambda}$ は、それぞれ海水中に含まれる溶存物質・懸濁物質による消散係数を示す。
- 4) 蛍光、燐光、多重散乱光およびサンプルセル（次項参照）による反射光の影響は無視する。これらに基づいて、クラゲ水濃度の計測原理は次式で与えられる。

$$I_t = I_w \exp\{-(\epsilon_{2\lambda} + \epsilon'_{2\lambda} + \epsilon_{3\lambda})cl\} \quad (6)$$

$$a_{j2\lambda} = \epsilon_{2\lambda} c \quad (7)$$

$$b_{j2\lambda} = \epsilon'_{2\lambda} c \quad (8)$$

$$a_{j3\lambda} = \epsilon_{3\lambda} c \quad (9)$$

ただし、 c はクラゲ水の濃度、各 ϵ は濃度消散係数とする。また、添字 j は、クラゲによる係数であることを示す。よって、光路長 l を一定とし、較正によって

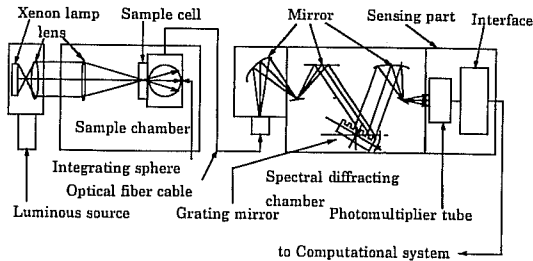


Fig. 2 Schematic diagram of spectrum analyzer 1

各 ε の和を求めれば、透過率 T (式(10)) を計測することで、式(6)により濃度が推定できる。

$$T_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{I_{W\lambda}} \times 100 [\%] \quad (10)$$

筆者等は、計測に影響を及ぼす要因として、透過光の波長およびクラゲ片の粒径を想定した。計測値のばらつきを指標として、これらのパラメータが透過率計測に与える影響を把握し、適切なパラメータの設定をする。

2.2 分光分析装置 1

クラゲ水の透過率計測に用いる試作分光分析装置 1 の概要を Fig. 2 および仕様を Table 1 に示す。本装置は、光源部、試料部、集光部、分光部、感光部および各部の制御や計測データの処理を行うコンピュータ部より構成される。

以下、本装置各部を光の流れにそって説明する。

- 1) 光源の照射光を、試料部入り口のレンズによってサンプルセルに集光し、これを密閉した試料 (クラゲ水) に入射する。
- 2) サンプルセルを透過した拡散光を積分球により集光し、光ファイバーを介して集光部に送る。
- 3) 集光部より分光部に送った光を回折ミラーによって分光する。回折ミラーの回転により、波長の異なる

Table 2 Experimental factors of spectrum analysis for jellyfish-water

Experimental factor	Level			
Concentration [%]	2	10	50	100
Size of jellyfish fragment [mm]	0.5	1.0	2.0	3.0
Wavelength [nm]	250~450 at 5 nm interval			

る光を感光部に入射する。

- 4) 感光部に設置した光電管によって受光強度を電圧に変換し、電圧データとしてコンピュータに取り込む。

本装置で透過率を計測する際には、基準となるスペクトル (リファレンス) をあらかじめ計測し、その後リファレンスと同様の波長域において試料の透過光スペクトルを計測する (式(10)参照)。

2.3 計測方法

クラゲ水の作成法について述べる。まず、金網を利用してクラゲを粉碎する (人手によって金網にクラゲを押し当て、網目より押し出す)。この際の網の目合を後述のクラゲ片粒径の代表値とする。粉碎したクラゲの重量を計測し、これをもとに各濃度に定量する。なお、本計測では試料として東京湾内で採集したミズクラゲ、上述のリファレンス用試料として比較的透明度の高い海水を使用した。

計測要因はクラゲ水濃度、クラゲ片粒径および波長とし、各水準の全ての組み合わせにおいて透過率を計測した。各要因における水準を Table 2 に示す。ただし、同じ水準の組み合わせにおける計測回数は 4 回である。

2.4 計測結果および考察

Fig. 3 に透過率計測結果の例を示す。これは、粒径 1.0mm における波長およびクラゲ水濃度に対する透

Table 1 Specifications of spectrum analyzers

	Analyzer 1	Analyzer 2
Luminous source	UV-xenon lamp 150 W	UV-xenon lamp 150 W
Sample cell	Fix-type crystal cell content: 4.40ml	Flow-type crystal cell content: 1.38ml
Spectral diffraction	Grating mirror (pulse motor drive)	Non diffraction
Photo-transmission	Optical fiber	Optical fiber
Sensor	Photomultiplier tube	Linear CCD sensor
Range of wavelength	200nm~700nm	200nm~700nm
Resolution of wavelength	0.5nm	5nm
Interface	GPIB	GPIB

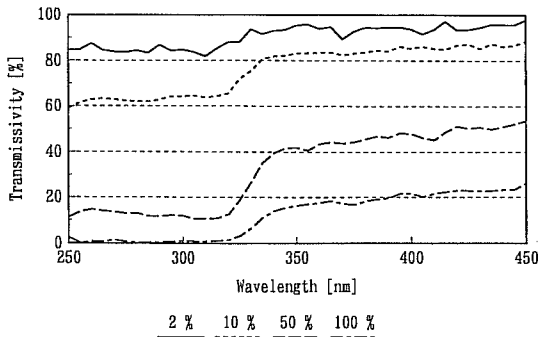


Fig. 3 Relation between wavelength of transmitted light and transmissivity with each concentration of jellyfish-water at size level of jellyfish fragments 1mm

過率の傾向である。図のように、クラゲ水の透過率は以下の特徴を示している。

波長 330nm 以下での透過率は、他の波長域に比べて、

- 1) クラゲ水濃度に対する変動率が大きく、
- 2) 低い値を示すので、低濃度でも飽和しない。

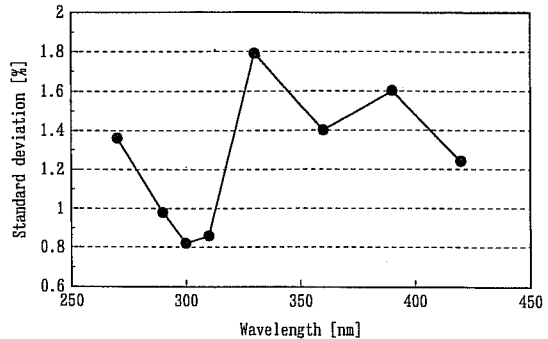
他の粒径の場合にも、同様な特徴がみられた。

クラゲ水濃度計測の分解能を高くするには、透過率の濃度に対する変動率が大きい方が好ましい。また、実用面では早期のクラゲ検知が要求されるため、低濃度における計測の必要性が高いと考える。これらの点からは、330nm 以下の波長域を選定して透過率を計測するのが適当である。

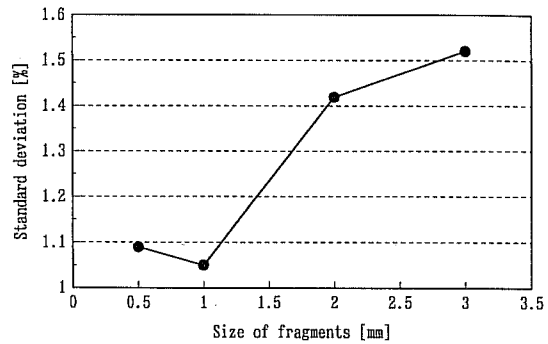
つぎに、計測誤差の点から透過率データの考察を試みるため、波長およびクラゲ片粒径の違いによる誤差分散の違いを検定する。

計測波長域から、270, 290, 300, 310, 330, 360, 390 および 420 [nm] を選択し、濃度および粒径別データを一つにまとめて、各波長における透過率の不偏分散を求めた (Fig. 4(a)参照)。その結果、300nm における誤差分散が最小であった。これより、300nm と他の各波長における誤差分散の違いについて F 検定を行った結果、有意水準 10% で 290, 310nm については有意差は認められず、そのほかは同水準で有意差が認められた。よって、計測精度の点からも 290 から 310nm の波長域を選定して透過率を計測するのが適当であり、この波長域は前述の分解能条件も満足している。

同様にして求めたクラゲ片粒径 (0.5, 1.0, 2.0 および 3.0 [mm]) の違いによる誤差分散の違いを Fig. 4



(a)



(b)

Fig. 4 Relation between standard deviation of transmissivity and each experimental factor; (a) wavelength of transmitted light, (b) size of jellyfish fragments

(b)に示す。これに対する F 検定の結果、有意水準 10% で 0.5, 1.0mm 間 (グループ 1) および 2.0, 3.0mm 間 (グループ 2) についてはそれぞれ有意差が認められず、グループ 1 とグループ 2 の間には同水準で有意差が認められた。よって、計測範囲内では、クラゲ片粒径は小さい方が透過率の計測における誤差分散は小さくなるのがわかる。

3. 粉碎システム

本節では、粉碎システムでの粉碎手法 (これにより、クラゲ片粒径が決定する) について検討および評価するために、試作実験装置を用いて粉碎実験を行う。さらに、この結果をもとに最適な粉碎盤 (3.1 参照) の選定を行う。

3.1 粉碎実験装置

粉碎実験装置の概要を Fig. 5 に示す。本装置は水流ポンプ (定格出力 5.5kW)、粉碎盤および圧力計より構成される。本装置による粉碎は、

- 1) ポンプにより水流を発生させ、クラゲを海水とと

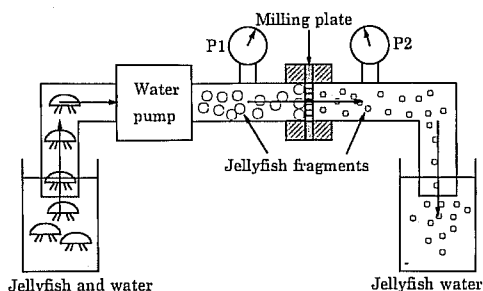


Fig. 5 Schematic diagram of experimental milling machine

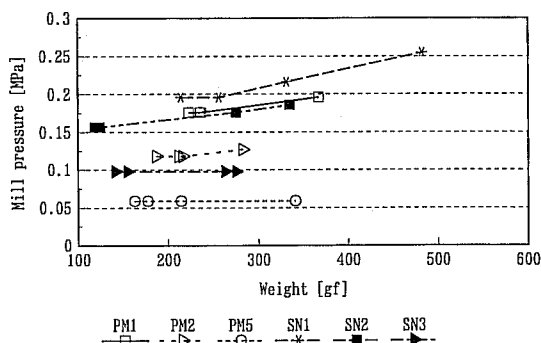


Fig. 6 Relation between mass of jellyfish milled and pressure required for milling with each milling plate; PM*i* means punching metal with circle hole diameter *i* mm, and SN*i* means stainless-steel net with grid scale *i* mm.

もに吸引する,

- 2) 吸引されたクラゲはポンプ内のインペラにより初期粉碎されたのち、粉碎盤へ送られる,
 - 3) さらに、水圧によりクラゲを粉碎盤の穴より押し出して粉碎を完了する,
- という手順で行われる。

粉碎性能に関して考慮すべき重要なパラメータは、粉碎に要する水圧およびクラゲ片の粒径である。以下の粉碎実験では、粉碎盤の穴形状および大きさが、これらのパラメータへ及ぼす影響について検討を行う。

3.2 実験方法

実験要因は粉碎盤の穴形状および大きさである。粉碎盤の種類については、金網（目合：1, 2, 3 [mm]）および円形穴パンチングメタル（穴径：1, 2, 5 [mm]）を使用する（各々JIS標準）。これらの粉碎盤を本装置に装着してクラゲの粉碎を行い、各場合における供試クラゲの重量、粉碎圧力、粉碎後のクラゲ片の粒径分布を計測する。粒径分布に関しては、上述の水準と

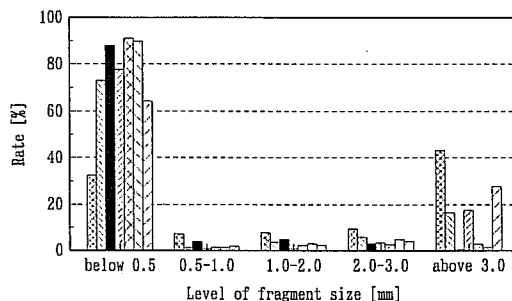


Fig. 7 Size of jellyfish fragments with each milling plate; Pump means milling with only pump. Regarding other symbols see Fig. 6.

ポンプインペラによる初期粉碎のみの場合も比較をする。なお、粉碎圧力は圧力計1および2（Fig.5）でのピーク値の差として求める。また、粒径分布の計測では、金網ふるい（目合：0.5, 1.0, 2.0, 3.0 [mm]）を用いて5段階に分類する。

3.3 実験結果および考察

Fig. 6に粉碎圧力と供試クラゲ重量の関係を示す。ただし、PM(*i*)はパンチングメタル、穴径 *i* mmの粉碎盤、SN(*i*)は金網、目合 *i* mmの粉碎盤を意味する。この図より、以下の特徴が認められる。

- 1) PM(5)およびSN(3)に関しては、供試した範囲内で、重量によらず圧力は一定であり、他の場合と比べて小さい。
- 2) 他の粉碎盤に関しては、重量の増加とともに一次関数的に圧力も増加する。この場合では、PM(2)による圧力が最小である。
- 3) ポンプのみによる粉碎では粉碎盤を用いる場合と比べ、粒径の大きいクラゲ片の割合が高くなる。
- 4) 粉碎盤を用いる場合では、PM(2), SN(1), SN(2)が粒径の小さいものの割合が最も高くなる。

なお、PM(1)の場合に、3 mm以上の粒径片の割合が高いのは、粉碎時にクラゲ片が粉碎盤を通過せず、装置パイプ内に残留するためである。

第2節での考察より、クラゲ片の粒径は小さい方が、計測精度は高くなることを確認した。また、ポンプ動力に対する負荷の点では、粉碎圧力は小さい方が望ましい。これらの点を考慮して、上記1)から4)の結

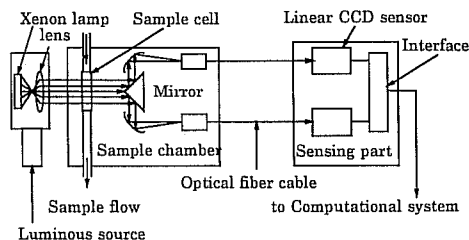
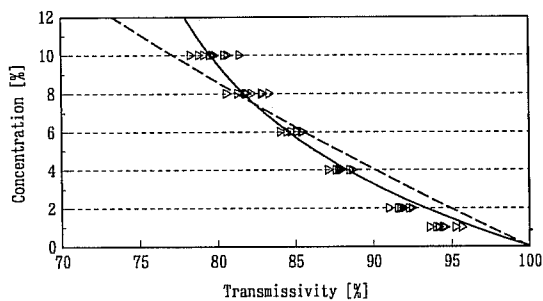
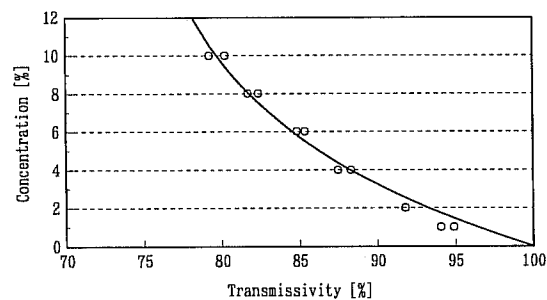


Fig. 8 Schematic diagram of spectrum analyzer 2



measurement (300 nm) curve 1 curve 2

(a)



mean value (300 nm) regression curve

(b)

Fig. 9 Results of regression analysis between transmissivity and concentration of jellyfish-water with wavelength of transmitted light 300nm; (a) by using raw data of measurements (curve 1 formula(11), curve 2 formula(12)), (b) by using mean values of measurements (regression curve formula(12)).

果を検討し、粉碎盤としてPM(2)を選定する。

4. 分光計測システム

本節では、分光計測システムにおいて使用する試作分光分析装置2について紹介する。また、第2節、第3節で選定した波長および粉碎盤を用いて分光計測を行い、透過率-クラゲ水濃度の検量線について検討する。さらに、その濃度計測の精度を評価して、本検知

Table 3 Results of regression analysis using raw data of measurements

Wavelength [nm]	Type	Coefficient	R ²	σ [%]
290	A	$a_i: -3.70 \times 10$	0.964	1.1
	B	$a_z: -6.57 \quad b: 3.72 \times 10^{-2}$	0.968	0.6
300	A	$a_i: -3.86 \times 10$	0.977	1.5
	B	$a_z: -7.12 \quad b: 3.69 \times 10^{-2}$	0.969	0.9
310	A	$a_i: -3.76 \times 10$	0.971	1.8
	B	$a_z: -6.85 \quad b: 3.67 \times 10^{-2}$	0.976	1.0

Type A: $c = a_1 \ln(T/100)$, Type B: $c = a_2 \ln\{b(T-100) + 1\}$ where T is transmissivity [%] and c is concentration of jellyfish-water [%].

R²: square of correlation coefficient between T and c
σ: standard error of c

システムの実用可能性を示す。

4.1 フローセルを用いた分光分析装置 2

Fig. 8 に本分析装置の概要を示す。本装置は、光源部、試料部、集光部、感光部およびコンピュータ部より構成される。本装置が2.2で記述した装置1と異なる特徴的な点は、

- 1) サンプルセルが固定式セルではなく、流体をサンプルとするフローセルであること(本分光計測システムにおいては、ポンプによりクラゲ水をフローセルとクラゲ水タンク間 (Fig. 1 参照) で循環させる),
- 2) 感光部にリニア CCD センサを使用しているため、分光部が不要であり、高速なスペクトル分析が可能であること、

などである。その他の基本的な仕様や計測の手順に関しては同様である (2.2 および Table 1 参照)。

4.2 実験方法

第3節で選定した粉碎盤PM(2)によってクラゲを粉碎し、第2節で選定した波長 (290, 300, 310[nm]) において、クラゲ水の透過率を計測する。ただし、要因はクラゲ水の濃度とし、水準は1, 2, 4, 6, 8 および 10 [%] の6段階とした。各濃度の試料は2種類ずつ準備し (計12種類)、各波長と濃度の組み合わせにおいて、1試料につき5回の計測を行う (フローセル内の平均流速は4 cm/s)。この結果をもとに、透過率-クラゲ水濃度の検量線および濃度計測の精度について検討する。

4.3 実験結果および考察

Fig. 9(a)に、透過率-クラゲ水濃度の計測値および2種類の検量線を示す (これは波長300nmの場合であり、他の波長の場合にもほぼ同様の関係がみられ

Table 4 Results of regression analysis using mean values of measurements

Wavelength [nm]	Coefficient	R ²	σ [%]
290	a: -6.54 b: 3.74 × 10 ⁻²	0.982	0.4
300	a: -6.81 b: 3.79 × 10 ⁻²	0.986	0.5
310	a: -6.44 b: 3.80 × 10 ⁻²	0.991	0.6

These are results of regression analysis using mean values of measurements with the following formula.

$$c = a \ln \{b(T-100) + 1\}$$

T: transmissivity [%], c: concentration of jellyfish-water [%],

a and b: coefficients,

R²: square of correlation coefficient between T and c

σ: standard error of c

た)。これら透過率-濃度の検量線は、それぞれ式(11)および式(12)を用いて、最小二乗法により求めた。

$$c = a_1 \ln \left(\frac{T_\lambda}{100} \right) \quad (11)$$

$$c = a_2 \ln \{b(T_\lambda - 100) + 1\} \quad (12)$$

c: クラゲ水濃度 [%], T: 透過率 [%], a₁, a₂, b: 回帰係数

式(11)は式(6)および(10)より導かれる。式(12)は、式(11)に多重散乱光およびサンプルセルによる反射光の影響を考慮し、補正項(中原, 1987)をくわえて変形したものである。各波長における諸回帰係数、これをもとにした透過率と濃度の相関係数および標準誤差をTable 3に示す。

まず、2種類の検量線について比較検討する。Fig. 9(a)より、式(11)による検量線に比べて、式(12)による検量線の方が、計測値によく一致していることがわかる。また、濃度推定の標準誤差も、式(12)が小さい(Table 3参照)。よって、補正式(12)の方が回帰式として適している。これは、とくに、多重散乱光の影響が無視できないことを示すものとする。

つぎに、計測値のばらつきによる濃度推定誤差への影響について検討する。Fig. 9(a)の計測値に着目すると、一定の濃度に対する透過率の値が大きく分散している(この場合、標準偏差は0.55%)。筆者等は、この主因が試料中のクラゲ片浮遊状態の不均一性にあると考えた。そこで、これに起因する計測誤差を低減するために、透過率計測値の平均値をもとに、式(12)を用いて検量線を求めた。なお、平均値は同一の試料(データ数5個, 4.2参照)ごとに求めた。この結果をFig. 9(b)およびTable 4に示す。Fig. 9に示すよう

に、平均値(b)の場合においても計測値(a)の場合と同様に、式(12)による検量線は有効である。また、Table 3とTable 4における標準誤差σを比較すると、総じてTable 4中の値が小さい。これらより、濃度推定の際に透過率の計測値の平均値を用いれば、上記のクラゲ水の不均一性による誤差の影響が低減され、よりよい精度で推定できる。

平均値による検量線の標準誤差σについて、さらに検討をくわえる。各波長λの違いによる誤差分散σ²(λ)の違いについてF検定を行った結果、有意差は認められなかった。つぎに、これら標準誤差σの値を、海中のクラゲの出現密度と結び付けるために概算する(ただし、クラゲの平均重量を400gfとする(安田, 1990))。その結果、σ値0.4から0.6%は、1m立方の海中領域で、約10から15匹のクラゲ密度に相当する。これは、サンプリング後の密度であり、実海域での密度との関係はサンプリング手法による。今後、実海域で必要とされる精度と本システムの精度を適切に対応させるために、サンプリング手法の検討が必要であろう。

5. おわりに

本研究により得られた結論を以下にまとめる。

クラゲ水濃度を光の透過率により計測する場合、

- 1) 計測精度および分解能の点から、波長290nmから310nmの透過光を選定するのが適当である。
 - 2) また、計測精度の点より、クラゲ片粒径は小さい方が適している。
- 本検知システムにおいてクラゲ水濃度の計測をする場合、
- 3) 粉碎盤としてPM(2)を用いることにより、比較的低い粉碎圧力で理想的なクラゲ片の粒径分布が得られる。
 - 4) 透過率-クラゲ水濃度の検量線は、Lambert-Beer理論の拡張式に、多重散乱光およびサンプルセルの反射光による補正項をくわえた回帰式で適切に与えられる。また、この場合の計測平均誤差は0.4から0.6%である(透過光波長: 290から310nm, 粉碎盤: PM(2))。

以上の結果により、本システムの実用可能性を確認した。

今後は、a) クラゲに対する異物の混入、b) 海水の濁り等による計測への影響、並びに c) フィールドにおけるクラゲ出現密度と本システムによる計測値の

対応関係について研究を進める必要がある。

なお、分光分析装置の試作にあたり、多くのご助力をいただいたアイクリエイトシステム株式会社の池田氏に記して感謝の意を表す。

文 献

- 平松和昭・戸原義男・四ヶ所四男美・森 健 (1992) 光学素子を用いた浮遊物質濃度測定用センサの試作. 水産工学, 29, 91-100.
- 飯嶋訓司・川辺允志 (1990) クラゲの来襲条件とエアバブリングによる防除対策. クラゲの生態と防除対策(予稿集), 電気化学協会・海生生物汚損対策懇談会, 15-41.
- 稲垣 正・豊川雅哉 (1991) 超音波によるクラゲ探知に関する研究. 水産海洋研究会報 55, 25-34.
- 石井素文 (1990) 取水口の除塵装置によるクラゲ防除対策. クラゲの生態と防除対策(予稿集), 電気化学協会・海生生物汚損対策懇談会, 79-86.
- 黒木敏郎・松生 治 (1982) 黒木敏郎編, 海洋環境測定. 恒星社厚生閣, 32-37.
- 中原勝儼 (1987) 中原勝儼編, 分光測定入門. 学会出版センター, 123-138.
- 野上義夫 (1990) 光センサーによるクラゲの来襲予知. クラゲの生態と防除対策(予稿集), 電気化学協会・海生生物汚損対策懇談会, 7-12.
- 太田洋一 (1990) 超音波によるクラゲの来襲予知. クラゲの生態と防除対策(予稿集), 電気化学協会・海生生物汚損対策懇談会, 13-14.
- 斎藤清隆・濱田悦之・ユックナ テッパルーンラット・笹倉 豊喜 (1990) ミズクラゲのターゲットストレングスについて. 平成2年度水産工学研究推進会議報告書, 111-114.
- 佐藤信芳 (1990) 水流発生装置の開発について. クラゲの生態と防除対策(予稿集), 電気化学協会・海生生物汚損対策懇談会, 42-58.
- 戸田勝也 (1990) クラゲ流入網及びポンプ方式による防除対策. クラゲの生態と防除対策(予稿集), 電気化学協会・海生生物汚損対策懇談会, 59-78.
- 安田 徹 (1990) ミズクラゲ (*Aurelia aurita*) の生態. クラゲの生態と防除対策(予稿集), 電気化学協会・海生生物汚損対策懇談会, 1-4.